

# PRODUÇÃO DE RISER EM MATERIAL COMPÓSITO, SEU DESENVOLVIMENTO E TESTES

## **Sérgio Ricardo Milki de Sousa**

COPPE/PEM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, C.P. 68503, CEP. 21945-970, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: sergiomilki@uol.com.br

## **Armando Carlos de Pina Filho**

COPPE/PEM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, C.P. 68503, CEP. 21945-970, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: pina-filho@mecanica.coppe.ufrj.br

## **Max Suell Dutra**

COPPE/PEM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, C.P. 68503, CEP. 21945-970, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: max@mecanica.coppe.ufrj.br

**Resumo.** *O aumento da competição entre as empresas petrolíferas fez com que a extração de petróleo fosse levada cada vez mais em águas profundas. O sistema de risers atual é pesado, exigindo mecanismos de tração e flutuação de alto custo, com projetos regidos por considerações de fadiga. Risers construídos com materiais compósitos apresentam vantagens sobre os convencionais em aço, porque são mais leves, mais resistentes à fadiga, mais resistentes à corrosão, podem ser projetados para melhorar estruturalmente e mecanicamente o sistema, e são melhores isolantes térmicos. O objetivo do trabalho aqui apresentado é o estudo de risers fabricados em material compósito. Serão vistos detalhes sobre o projeto do riser, com parede tubular de compósito, procurando mostrar suas principais características e conseqüentes vantagens sobre risers convencionais.*

**Palavras-chave:** *materiais compósitos, petróleo, processos de fabricação, riser.*

## **1. INTRODUÇÃO**

O desenvolvimento de risers rígidos compósitos começou em meados de 1979, quando o Instituto Francês de Petróleo e aeroespacial desenvolveu tubos de alta performance, para aplicação na indústria de óleo e offshore, com aplicabilidade de 0,11 m de diâmetro e 34,50 MPa de pressão de trabalho no tubo composto. De 1979 até 1982 vários tubos de fibra de vidro e carbono foram testados. Testes mecânicos verificaram pressões de colapso, tração e flexão. Testes de fadiga, pressão interna e dobramento, foram executados. Os efeitos do óleo, água, água do mar, luz do sol foram investigados. Então em 1983, seis tubos híbridos de fibra de carbono e vidro, de 15 m de comprimento e 0,11 m de diâmetro interno, foram construídos e testados com sucesso em linhas destruídas e obstruídas em risers no Mar do Norte. Em 1985, iniciou-se o programa industrial para a construção de risers de compósitos de 0,23 m de diâmetro testados a pressões de colapso, tração, fadiga e flexão. Em 1988, foi proposto um segundo programa para estender o desenvolvimento para análise de tolerância de danos e durabilidade, tolerância residual dos danos nos testes de esforços, e testes de esforços cíclicos de fadiga.

Os resultados desses trabalhos iniciais foram encorajadores, mas acabaram estagnados, só retornando mais recentemente devido ao aumento da competição entre as empresas petrolíferas, que fez com que a extração de petróleo fosse levada cada vez mais em águas profundas. Como o sistema de risers atual é pesado, exigindo mecanismos de tração e flutuação de alto custo, com projetos

regidos por considerações de fadiga, a utilização de risers em material compósito se apresentou como uma excelente alternativa aos risers convencionais, fabricados em aço, apresentando vantagens por serem mais leves, mais resistentes à fadiga, mais resistentes à corrosão, podendo ser projetados para melhorar estruturalmente e mecanicamente o sistema, além de serem melhores isolantes térmicos.

O objetivo do trabalho aqui apresentado é o estudo de risers fabricados em material compósito. Serão vistos detalhes sobre o projeto do riser, com parede tubular de compósito, procurando mostrar suas principais características e conseqüentes vantagens sobre risers convencionais.

## 2. MATERIAIS COMPÓSITOS

As tecnologias modernas exigem, cada vez mais, materiais com diversas combinações, para obterem propriedades não atendidas por aços, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais. A engenharia busca, de uma forma geral, materiais com baixas densidades, rígidos e que sejam resistentes (ao impacto, à corrosão e abrasão). Sem dúvida é uma combinação relativamente difícil, pois os materiais mais resistentes são conseqüentemente mais densos, e com o aumento da rigidez diminui a resistência ao impacto. Devido a essa necessidade de ação combinada de propriedades, foram desenvolvidos os chamados materiais compósitos, que nada mais são do que materiais multifásicos, feitos através de processos artificiais, que exibem as propriedades das fases que são constituídos, obtendo melhor combinação de propriedades. As fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e separadas por uma interface distinta. Assim sendo, materiais como algumas ligas metálicas e cerâmicas não se enquadram nesse contexto, pois suas múltiplas fases são formadas por conseqüência de fenômenos naturais.

Muitos materiais compósitos são formados por apenas duas fases distintas que são: a matriz, que é contínua e envolve a outra que é chamada fase dispersa. Existe uma classificação dos compósitos em três tipos: compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras e os compósitos estruturais. A fase dispersa dos compósitos reforçados com partículas tem eixos iguais (Figura 1), as dimensões das partículas são aproximadamente as mesmas em todas as direções, enquanto nos compósitos reforçados com fibras a fase dispersa tem a geometria de uma fibra (Figura 2).

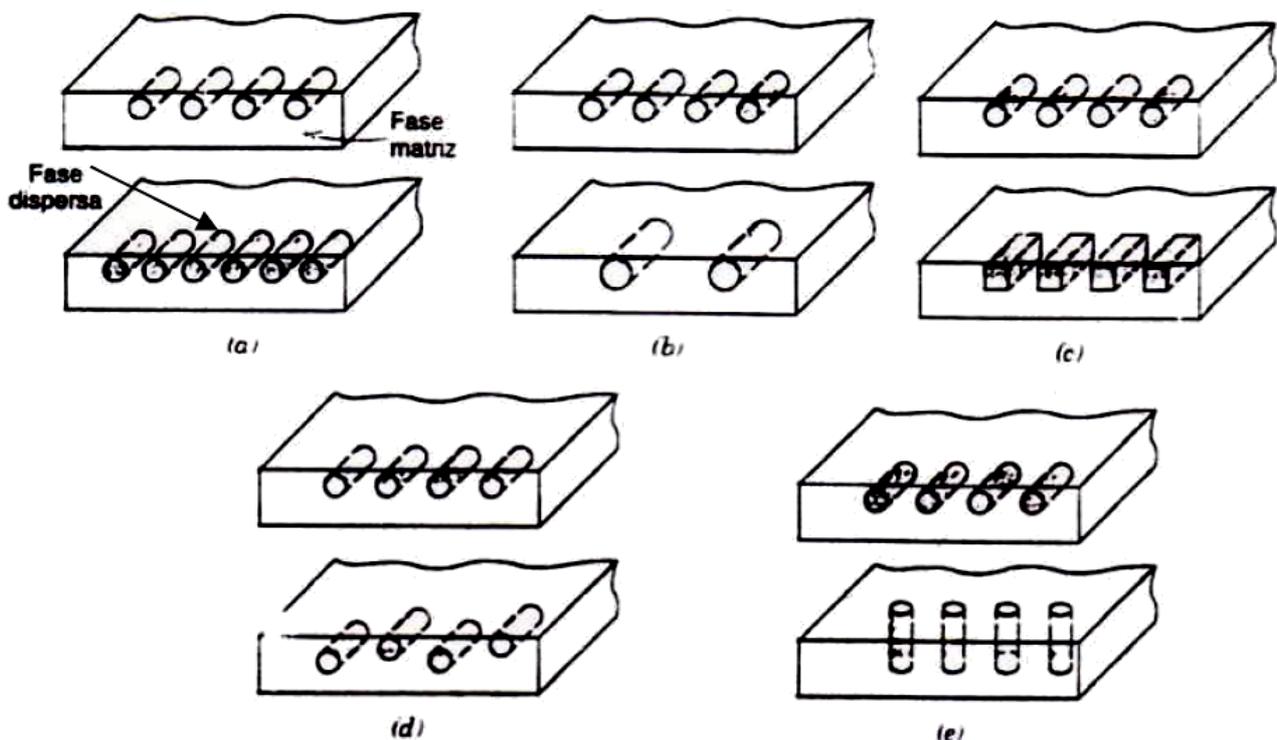


Figura 1. Várias distribuições das fases dispersas na matriz (Flinn e Trojan<sup>(1)</sup>).

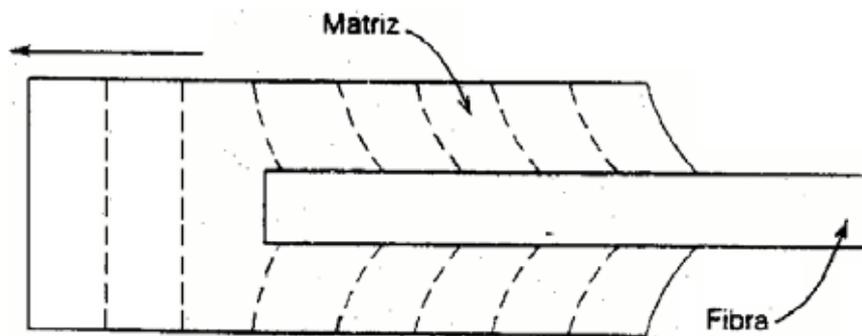


Figura 2. Fibra tracionada ocasionando deformação da matriz (Callister<sup>(2)</sup>).

Nos compósitos estruturais as propriedades dependem dos materiais constituintes e do projeto geométrico dos elementos, sendo os tipos mais comuns os painéis em sanduíche e os laminares. Nos compósitos laminares, folhas de compósitos anisotrópicos são cimentadas umas sobre as outras, alterando a direção de alta resistência com cada camada sucessiva, apresentando assim resistência relativamente alta em várias direções, enquanto os painéis em sanduíche consistem em duas folhas rígidas separadas por uma estrutura de recheio, fornecendo resistência com baixo peso, proporcionando resistência ao cisalhamento ao longo dos planos perpendiculares às faces.

### 3. PROJETO DO RISER

Funcionalmente, risers de compósitos devem ter a performance semelhante aos de aço. Geralmente, as funções do riser são: controlar o fluido contido e pressões no poço; ser um membro estrutural do sistema; ser o envoltório contendo o conduto para transportar fluidos para o reservatório, e do reservatório; e ser um dispositivo para guiar perfuradoras e ferramentas para dentro do poço. Nessas funções, risers de compósitos não exigem nenhuma técnica especial de manuseio ou equipamentos.

Com o intuito de se obter um parâmetro para referência, foi escolhido um riser de 0,28 m de diâmetro para revestimento simples e duplo. Essa configuração representa um excelente meio de demonstrar que risers de compósitos podem chegar aos requisitos estruturais dos serviços offshore. Além disso, será possível constatar que o projeto de risers de compósitos, tanto para simples, como duplo revestimento, terá um custo efetivo mais caro que o riser de aço.

#### 3.1. Parede Tubular de Compósito

Para tornar seu custo mais competitivo, o corpo do riser de compósito pode ser uma estrutura híbrida, composta de fibra de carbono e fibra de vidro numa matriz de epóxi, com o tubo sendo fabricado através do processo de “Filament Winding”, no qual as fibras reforçadas (impregnadas por uma resina de epóxi) são aplicadas num mandril girante com precisão nas orientações e espessuras. A estrutura composta é então curada pela aplicação de calor, resultando em um tubo sólido. Depois da extração do mandril, as camadas termoplásticas ou elastoméricas (internas e externas) são instaladas. Alguns trabalhos interessantes sobre o processo de “Filament Winding” são apresentados por Ellyin et al.<sup>(3)</sup> e Carrino et al.<sup>(4)</sup>.

No projeto do riser de compósito, a quantidade de fibra de carbono circunferencial é determinada pela pressão exercida na extremidade do topo do poço, próximo à árvore de natal (Shut-in Well Head Pressure - SIWHP). Esse material é igualmente distribuído nas superfícies internas e externas da parede do tubo, para maximizar a capacidade de resistência pela pressão externa. Essas camadas são híbridas, com epóxi e fibra de vidro, aumentando a resistência à avaria e impacto. Um feixe de fibras circunferencial de epóxi e fibra de vidro, localizado na metade das paredes do tubo, é também usado como parte de maior importância do material, a qual serve para aumentar a estabilidade da seção transversal, aumentando a distância entre os reforços circunferenciais de carbono internos e externos. As camadas de carbono de enrolamento longitudinal no riser de compósito fornecem rigidez e resistência a esforços axiais. Esse aumento de

resistência axial resulta numa parede de tubo mais que adequada para resistência a cargas axiais geradas pela SIWHP (Figura 3).

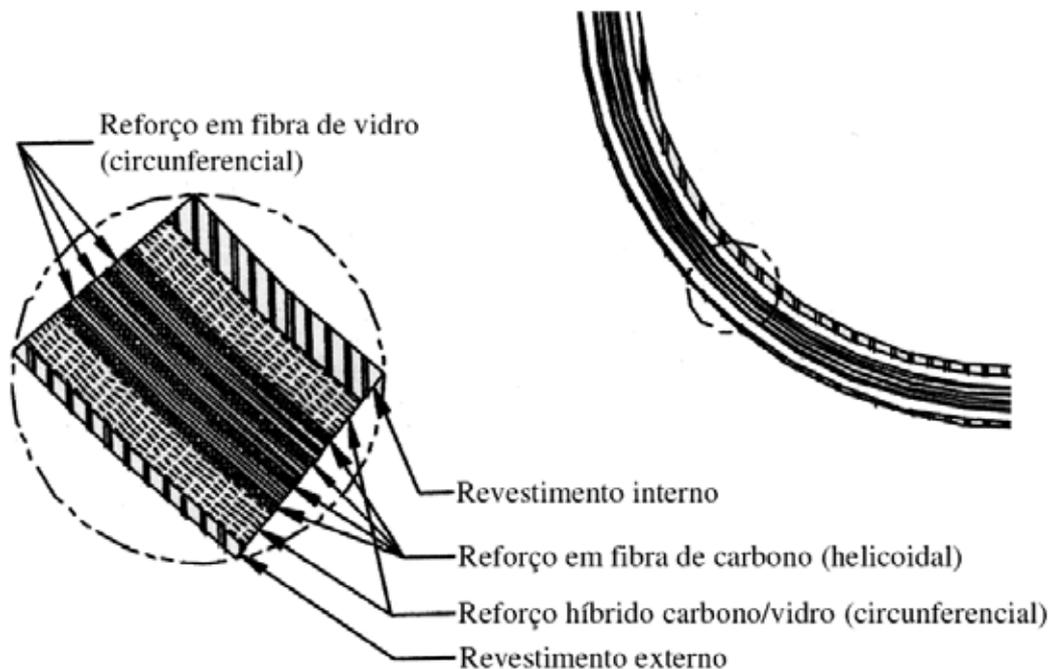


Figura 3. Composição da parede tubular (Baldwin et al.<sup>(5)</sup>).

### 3.2. Interface Compósito-Metal

Admitindo-se que o riser suporte primeiramente tração axial e pressão de carregamento (interna e externa), a interface selecionada do projeto é uma múltipla configuração de fechamento, na qual cada parte final adequada será incorporada dentro de cada parte final do tubo composto durante o processo de "Filament Winding" (veja Figura 4).



Figura 4. Interface compósito-metal de fechamento múltiplo do riser (Baldwin et al.<sup>(5)</sup>).

Em risers de compósitos, a ausência de cargas de torção significativas faz o uso do fechamento atrativo. O mecanismo de transferência de cargas em um múltiplo fechamento pode variar muito, dependendo da parte geométrica. Cargas axiais são transferidas entre o tubo composto e encaixes de aço através das faces amarradas. No intuito de obter boa distribuição das cargas entre múltiplos fechamentos, deve-se levar em conta a relativa rigidez do aço e do material compósito. Devido aos

vários fatores que afetam o desempenho, o projeto e análise de uma união de múltiplo fechamento devem ser executados usando o método de elementos finitos.

Quando modos de falhas observados em testes são correlacionados às previsões de esforços em análises por elementos finitos, esses dados são usados para avaliar o desempenho de uma dada configuração relativa ao material de projeto. Tendo estabelecido boa correlação entre testes observados e análises, o projeto poderá então, seguramente, ser avaliado pelos efeitos geométricos e mudanças de materiais.

#### **4. FABRICAÇÃO DO RISER**

Uma vez que a performance dos compósitos depende do processo de fabricação, todos os testes devem ser levados para amostras de risers de compósitos fabricados por “Filament Winding”. As amostras devem ser fabricadas com a laminação sugerida, e interface compósito-metal com tubo de compósito de comprimento pré-determinado entre os encaixes metálicos das extremidades. Devem ser utilizadas linhas internas e externas de borracha nitrílica hidrogenada (HNBR), para as peças requeridas pelo tipo de teste a ser feito.

As juntas de fixação finais para as amostras de risers de compósitos devem ser fabricadas em um centro multi-ferramental de Comando Numérico Computadorizado (CNC). Inspeções das juntas finais incluem: verificação dimensional, certificação do material e inspeção não destrutiva. As juntas são fosfatizadas e embaladas para embarque. Quando no recebimento pelo fabricante do compósito, cada junta deverá estar desengraxada com solvente, e todas as superfícies e roscas protegidas. Por fim, HNBR pré-moldado é depositado sobre o perfil na interface da junta compósito-metal, e a montagem colocada num molde de cura num forno.

Em relação à fabricação do corpo do riser, antes de começar o enrolamento do compósito, as juntas finais de união são instaladas no mandril. As juntas são precisamente localizadas e suspensas por ferramentas especiais em cada extremidade do mandril. Depois, o HNBR (não curado) é enrolado sobre o mandril para formar o revestimento interno. As camadas de enrolamentos longitudinais, que fornecem resistência a esforços axiais e rigidez às juntas do riser, são enroladas de um lado para outro das extremidades das juntas e invertidas através de um pequeno contorno, que finaliza o formato final, localizado para fora (cúpula).

Após completar as camadas helicoidais, elas ficarão firmes entre a geometria de fechamento e a cúpula (domos). As fibras helicoidais serão então compactadas nos sulcos das juntas pela fibra estrutural que está acima. Reforços axiais são incorporados dentro do fechamento para melhorar a qualidade da junta. Para facilitar alta produtividade, fibra de vidro e fibra de carbono são impregnadas com resinas durante o processo de enrolamento. O método de impregnação é uma propriedade que é consistentemente controlada, para manter o percentual de resina na faixa de 2% por peso. A tração na fibra é outra propriedade do processo que é controlada pelo ponto de impregnação. As seqüências de camadas e ângulos de enrolamentos, assim como a composição da resina e tração na fibra, são todos controlados pelo programa de enrolamento.

Numa próxima etapa, o mandril/montagem do enrolador será removido da máquina e colocado num dispositivo de cura. Após a cura, o compósito será visualmente examinado por dobramento de fibras e distorção, e o processo de cura também será verificado. Depois a peça será montada de volta dentro da máquina de enrolamento, onde uma grossa camada de HNBR envolverá o diâmetro externo do compósito. Sobre o HNBR será enrolado uma camada de fibra de vidro na sua circunferência, e uma outra camada de forma helicoidal, que compactará a borracha e fornecerá proteção extra para abrasão ao HNBR.

Com o término do recobrimento, o mandril/montagem retornará para cura no forno. Após resfriamento, o mandril será removido e a peça inspecionada, antes do procedimento do teste de aprovação. Como parte do processo de fabricação, cada junta do riser de compósito estará sujeita a teste hidrostático e de estanqueidade, para comprovar integridade do material. Depois a peça será pesada, e finalmente a inspeção dimensional realizada.

A descrição da fabricação aqui apresentada representa não somente um procedimento para construção de um protótipo, mas também pode ser utilizada em linha de produção (veja maiores detalhes em Johnson et al.<sup>(6)</sup>).

## 5. TESTES E CARACTERÍSTICAS DO RISER

Os testes realizados tiveram como foco principal as uniões de risers de compósitos sobre as ações de tração axial, pressões internas e externas, e as combinações dessas cargas. A capacidade de resistir aos esforços de flexão não foi avaliada, pois esses efeitos são encontrados apenas na parte mais profunda das juntas de tensões e na seção superior do riser, geralmente acima da lâmina d'água. O restante (aproximadamente 90%) das experiências com risers estão relacionadas a forças de tração combinadas com pressão.

Foi dada uma maior atenção à seção superior do riser da plataforma, até aproximadamente 55 m abaixo da linha d'água, remanescente em aço, devido à segurança de incêndio e considerações de danos em serviço. A distinção do projeto de risers de compósitos foi feita testando, em larga escala, peças com o proposto laminado e compósito-metal nos encaixes de extremidade.

O objetivo dos testes foi a geração de dados suficientes para correlacionar analiticamente e empiricamente, possibilitando uma avaliação estatística. Os resultados foram correlacionados com outros fornecidos pela análise de elementos finitos. As cargas combinadas, nas amostras, foram testadas sob condições de pressões internas com efeitos finais. A falha por efeito de tração axial ocorreu na interface compósito-metal em torno de 3747 KN (veja Figura 5).

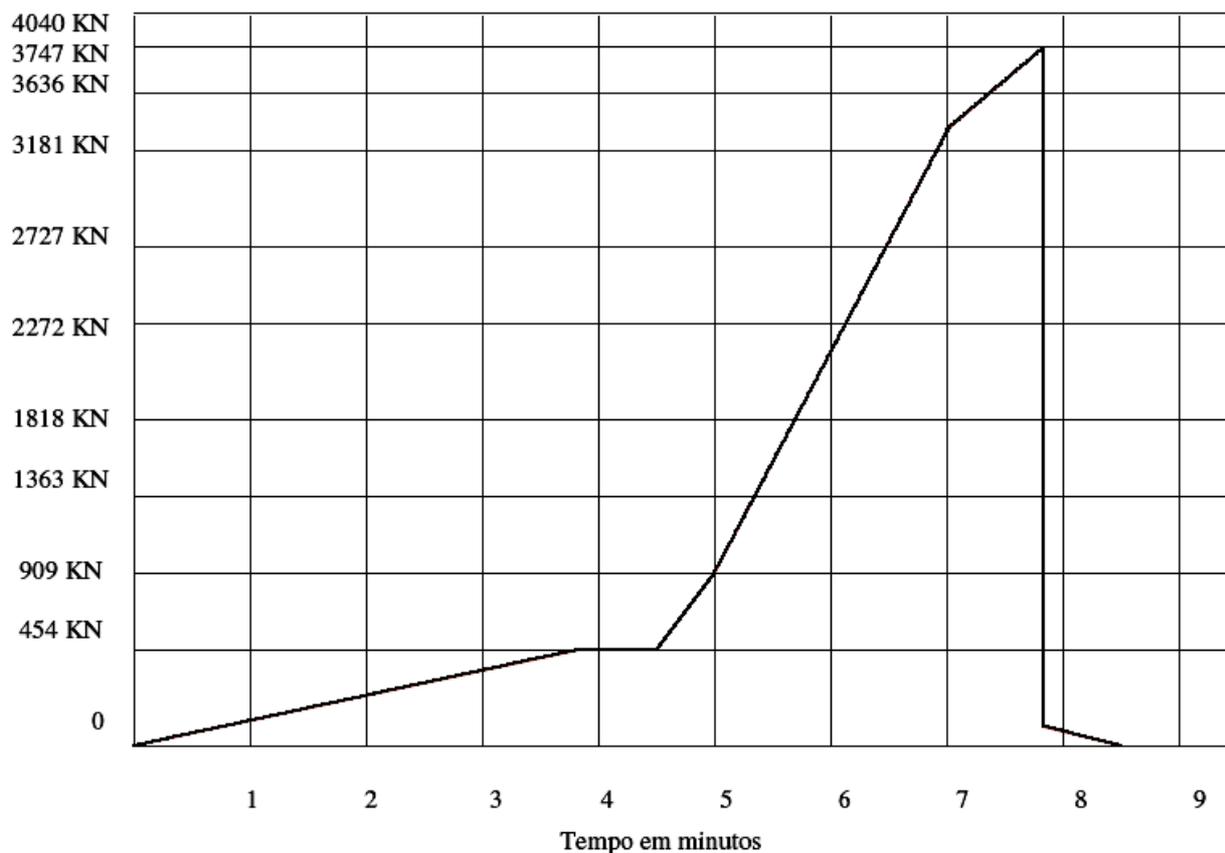


Figura 5. Gráfico Tração x Tempo para o riser de compósito.

Segundo Baldwin et al.<sup>(5)</sup>, uma análise de elementos finitos mostra que existe uma mesma probabilidade de falha do riser de compósito, sob condições de teste de pressão com efeito combinado de pressão e carga axial. Os testes de pressão com efeitos combinados (pressão combinada com carga axial) de seis amostras resultaram em três falhas na interface compósito-metal, e três falhas nos corpos dos tubos em torno de 84 MPa (veja Figura 6).

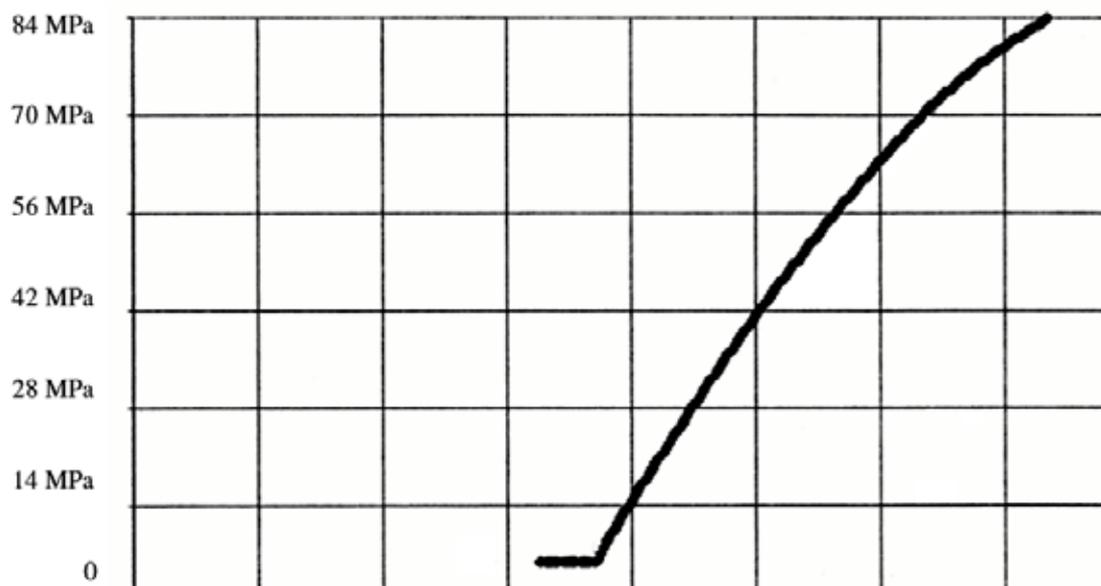


Figura 6. Gráfico pressão x Tempo para o riser de compósito (Baldwin et al.<sup>(5)</sup>).

No sentido de estabelecer confiança industrial no comportamento do riser de compósito a longo prazo, Baldwin et al.<sup>(5)</sup> também realizaram testes sob condições de fadiga estática (tensões de ruptura). Nesse caso, o objetivo era estabelecer os valores de resistência permissíveis, dependentes do tempo. Os resultados dos testes cíclicos de fadiga são fornecidos pelas curvas S-N. A inclinação das curvas de fadiga depende do tipo de material (carbono ou vidro) e do modo de falha (tração, compressão ou cisalhamento). O valor da resistência à fadiga é igual a resistência estática das juntas na temperatura de trabalho. Na Figura 7, a inclinação da linha de regressão dos resultados dos testes demonstraram a perda de resistência por volta de 2,5% por década.

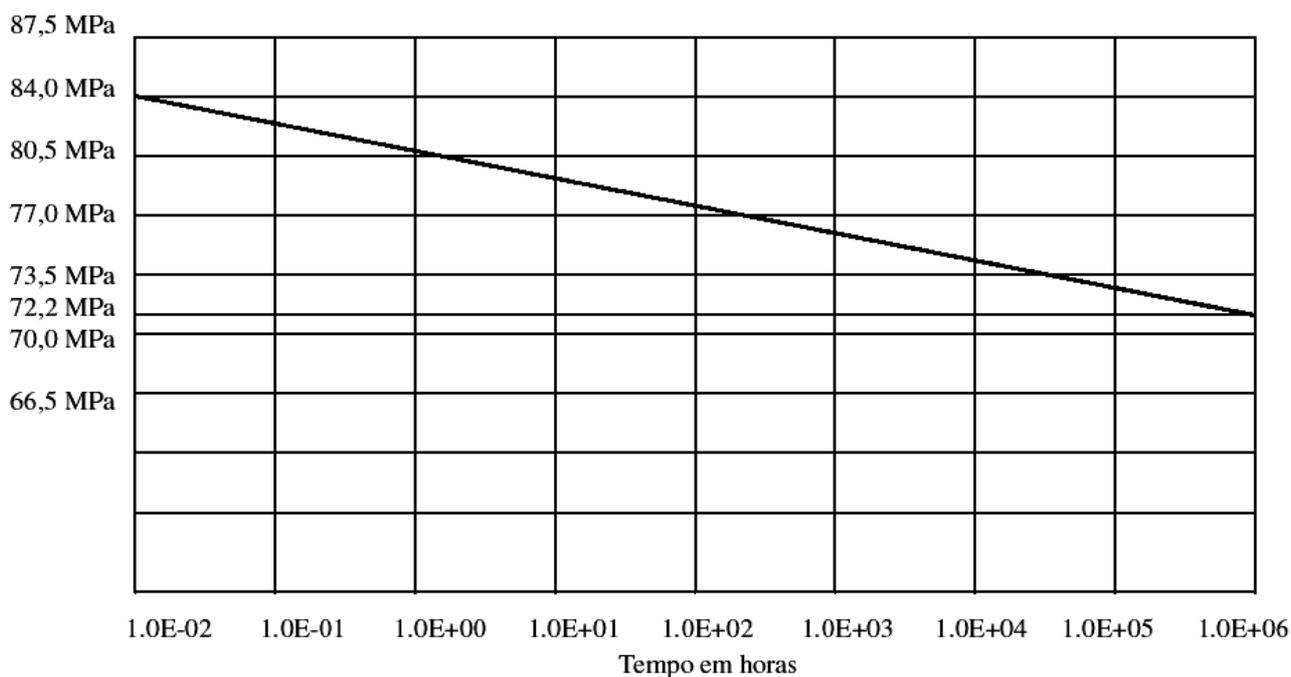


Figura 7. Fadiga estática (tensão de ruptura)(Baldwin et al.<sup>(5)</sup>).

A partir dos testes realizados anteriormente, considerando um riser em material compósito (anisotrópico) de raio igual a 280,0 mm para camisa externa e 260,5 mm para camisa interna, a ser utilizado numa profundidade de 1000 m, admitindo pressão interna combinada de 105 MPa, tração axial de 3747 KN e sujeito a uma pressão externa de 10 MPa (diferencial), pelo Método de

Elementos Finitos usando axi-simetria, mais especificamente pelo software ANSYS 8.1, foi realizada uma simulação da estrutura, em termos de sua deformada, para as solicitações descritas, as quais se enquadram nos padrões para cálculos de risers rígidos verticais convencionais. A Figura 8 apresenta a estrutura não deformada, enquanto que a Figura 9 mostra a estrutura deformada do riser em material compósito.

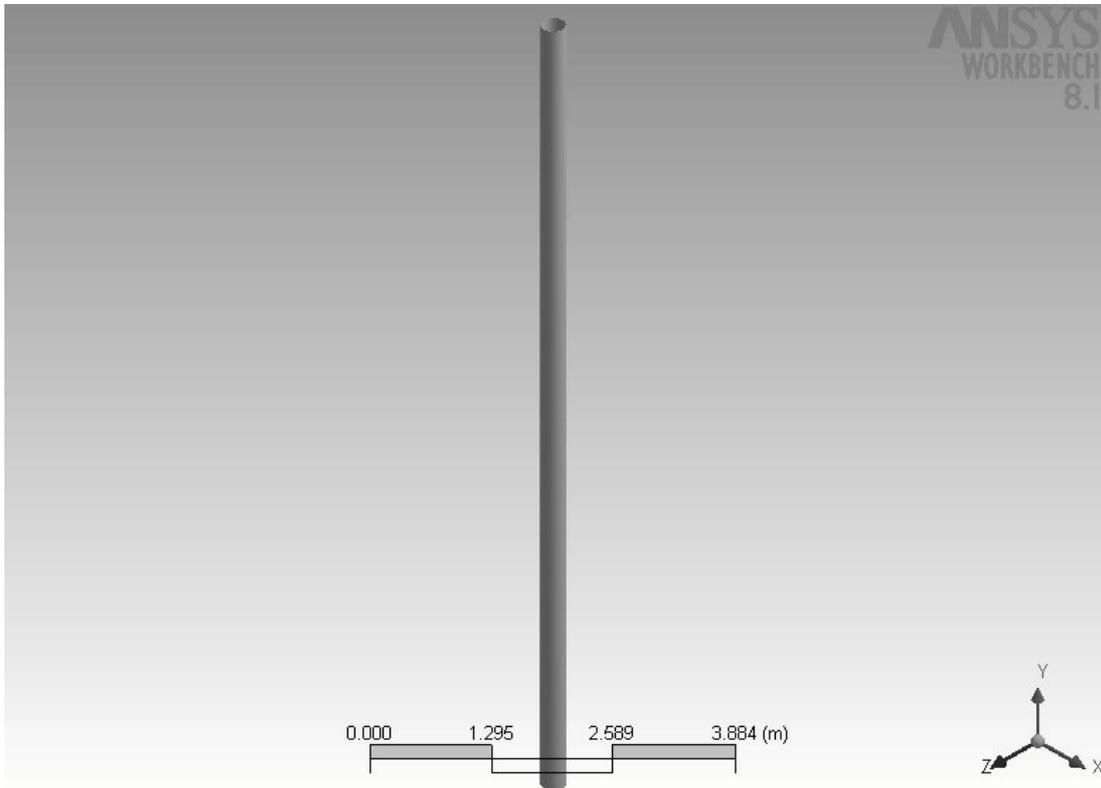


Figura 8. Estrutura não deformada do riser em material compósito.

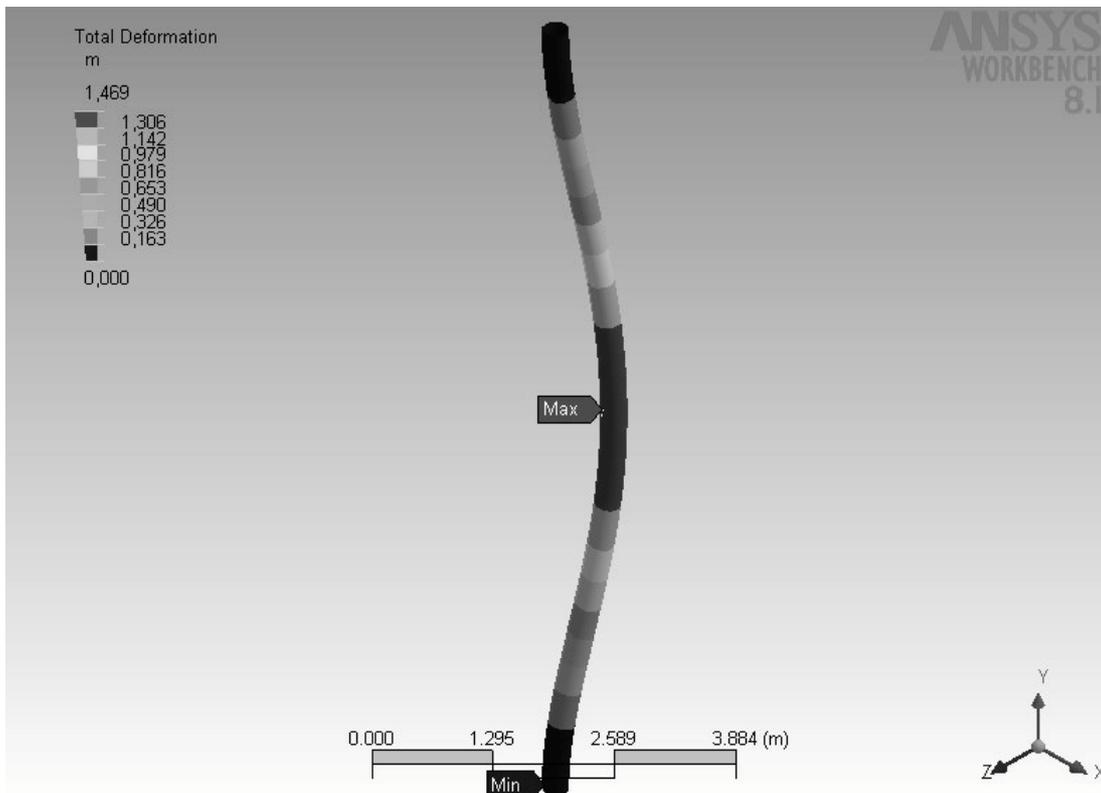


Figura 9. Estrutura deformada do riser em material compósito.

## 6. CONCLUSÃO

O trabalho aqui apresentado procurou mostrar as etapas de produção de um riser fabricado em material compósito. Os testes realizados demonstraram que o corpo do tubo e a interface compósito-metal final têm margem de segurança adequada, no que se refere às cargas em serviço para riser de compósitos. Risers produzidos em material compósito têm um grande potencial de redução de custos, principalmente pela redução de peso que resultará em baixa tração no topo do riser, e conseqüentemente baixas cargas suportadas pela plataforma. Uma redução de cargas no convés possibilita redução estrutural no peso do mesmo, reduzindo tensões nos risers e nos sistemas de suporte, possibilitando uma menor unidade flutuante ou casco, reduzindo o sistema de amarras, e simplificando a ancoragem ou fundação. Dessa forma, uma maior aceitação do riser composto ajudaria a reduzir ou eliminar a necessidade de sistema de tração no topo, resultando em uma melhor relação custo-benefício na construção da plataforma. Outros benefícios em potencial do riser em compósito incluem: a redução de manutenção e inspeção no revestimento, redução nos custos de instalação, redução da proteção catódica e aumento da resistência térmica.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro fornecido no decorrer deste presente trabalho.

## 8. REFERÊNCIAS

1. FLINN, A. R.; TROJAN, P. K. **Engineering Materials and Their Applications**. Ed. 4, New York: John Wiley & Sons, 1990.
2. CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais, Uma Introdução**. Ed. 5, Brasil: LTC, 2000.
3. ELLYIN, F.; WOLODKO, J.; DORLING, D.; GLOVER A.; JACK, T. Fiber Reinforced Composites in Pipelines Applications: Designs Issues and Current Research. In: **3rd International Pipeline Conference**. American Society of Mechanical Engineering, 2000.
4. CARRINO, L.; POLINI, W.; SORRENTINO, L. Modular structure of a new feed-deposition head for a robotized filament winding cell. **Composites Science and technology**, v. 63, n. 15, p. 2255-2263, nov. 2003.
5. BALDWIN, D. D.; NEWHOUSE, N.; LO, K. H. Composite Production Riser development. In: **2nd International Conference on Composite Materials for Offshore Operations**. CMOO-2, Houston, USA, 1997.
6. JOHNSON, B. D.; BALDWIN, D. D.; LONG, J. R. Mechanical Performance of Composite Production risers. In: **Offshore Technology Conference**. OTC 11008, Houston, USA, 1999.

# PRODUCTION OF RISER IN COMPOSITE MATERIAL, ITS DEVELOPMENT AND TESTS

## **Sérgio Ricardo Milki de Sousa**

COPPE/PEM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Technology Center, P.O.Box 68503, Zip Code 21945-970, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: sergiomilki@uol.com.br

## **Armando Carlos de Pina Filho**

COPPE/PEM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Technology Center, P.O.Box 68503, Zip Code 21945-970, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: pina-filho@mecanica.coppe.ufrj.br

## **Max Suell Dutra**

COPPE/PEM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Technology Center, P.O.Box 68503, Zip Code 21945-970, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: max@mecanica.coppe.ufrj.br

***Abstract.** The increase of the competition between the petroliferous companies made with that the extraction of oil was taken each time more in deep waters. The current system of risers is weighed, demanding mechanisms of traction and fluctuation of high cost, with projects conducted by considerations of fatigue. Risers constructed with composite materials presents advantages on the conventional in steel, because they are lighter, more resistant to the fatigue, more resistant to the corrosion, they can be projected to improve structurally and mechanically the system, and are better thermal insulators. The objective of the work presented here is the study of risers manufactured on composite material. Details about the project of riser, with tubular wall of composite, will be seen, looking for to show to its main characteristics and consequences advantages on conventional risers.*

***Keywords:** composite materials, oil, manufacture processes, riser.*